



## Pemodelan Dinamika CO<sub>2</sub> Pada Tanaman Kelapa Sawit

Dynamics Modeling of CO<sub>2</sub> in Oil Palm

**Meriana Ina Kii, Tania June\*, I Putu Santikayasa**

Departemen Geofisika dan Meteorologi, Gedung FMIPA, IPB, Jl. Meranti Wing 19 Lv.4 Kampus IPB Darmaga, Bogor 16680

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 24 February 2020

Received in revised from 7 April 2020

Accepted 2 June 2020

doi: 10.29244/j.agromet.34.1.42-54

#### Keywords:

Biomass

Gross Primary Production

Net Ecosystem Exchange

Net Primary Production

Modeling

### ABSTRACT

Oil palm plantation has a high potency to absorb carbon. Limited observed data and expensive instrumentations to measure the absorbed carbon have caused an inaccurate estimation of carbon storage from oil palm. The objectives of this research were to develop a CO<sub>2</sub> absorption model, and to calculate the carbon cycle based on climate factors and plant age. CO<sub>2</sub> absorption was derived from gross primary production (GPP) and net primary production (NPP), which were based on solar radiation. From NPP we derived net ecosystem exchange (NEE) by calculating the difference between NPP and soil respiration. Our results showed that age of oil palm has influenced the CO<sub>2</sub> absorption from 9.8 (1 year) to 117 tons ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup> (19 years), with average of 86.5 tons ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup> (over 25-year life cycle). We validated our NPP model with biomass that indicated a very good performance of the model with R<sup>2</sup> 0.95 and RMSE 1.81. Meanwhile, the performance of NEE model was slightly lower (R<sup>2</sup> 0.71 and 0.72, for wet and dry conditions), but the model had a similar pattern with the measured NEE. Based on the model performance, the findings imply that the model is useful to estimate CO<sub>2</sub> absorption, where there is no eddy covariance measurement. This research suggests that carbon modeling will contribute to global terrestrial carbon modeling.

### PENDAHULUAN

Tanaman kelapa sawit merupakan tanaman dengan produksi minyak yang tinggi jika dibandingkan penghasil minyak nabati lainnya. Minyak kelapa sawit banyak digunakan untuk produk makanan dan sebagian kecil untuk industri oleokimia (Ahmad et al. 2019; Koh et al. 2019; Rincón et al. 2019). Kelapa sawit sangat berperan untuk pengembangan *biofuel* di Indonesia sebagai bahan campuran pengganti bahan bakar minyak fosil, seperti biodiesel. Berbagai manfaat tersebut menarik berbagai pihak untuk melakukan ekspansi perkebunan kelapa sawit di kawasan tropis termasuk di Indonesia. Peranan kelapa sawit terhadap peningkatan ekonomi setiap tahun menyebabkan ekspansi perkebunan kelapa sawit semakin besar. Namun, penyiapan awal perkebunan dengan cara membuka hutan alam menyebabkan kerusakan lingkungan. Pembukaan hutan tersebut sering dilakukan dengan proses pembakaran lahan, yang berbiaya murah dan paling mudah untuk dilakukan.

Pembukaan lahan dengan teknik pembakaran telah menyebabkan polusi asap, keanekaragaman hayati yang berkurang, dan pemanasan global (Fei et al. 2018; Ke et al. 2019; Kollanus et al. 2017; Malley et al. 2016). Meskipun demikian, tidak semua perkebunan kelapa sawit dihasilkan dari proses pembukaan hutan alam, seperti perkebunan yang memanfaatkan lahan semak dan lahan marjinal.

Perkebunan kelapa sawit termasuk salah satu ekosistem teresterial yang berperan pada siklus karbon global yaitu sebagai tanaman penyerap CO<sub>2</sub>. Kelapa sawit memiliki kemampuan penyerapan CO<sub>2</sub> sebesar ~76 ton CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> tahun<sup>-1</sup> (Mariati 2014). Nilai tersebut bervariasi yang dipengaruhi oleh umur tanaman dan jenis ekosistem. Penyerapan CO<sub>2</sub> pada suatu ekosistem dapat didekati dengan konsep *net primary production* (NPP). NPP merupakan perhitungan matematis sederhana untuk mengetahui jumlah CO<sub>2</sub> yang diserap dan ditahan oleh tanaman dalam proses fotosintesis.

Pada suatu ekosistem, jumlah CO<sub>2</sub> yang dapat diserap dipengaruhi oleh suhu yang dideteksi dengan

\*Corresponding author. [taniajune@apps.ipb.ac.id](mailto:taniajune@apps.ipb.ac.id)

indeks suhu ( $T_{\text{scalar}}$ ), air yang dideteksi dengan indeks air ( $W_{\text{scalar}}$ ) pada tanaman, kelembaban udara, radiasi surya, dan indeks luas daun (LAI) (June et al. 2006). Pengukuran fluks  $\text{CO}_2$  dari suatu ekosistem dapat dilakukan dengan pendekatan sistem *eddy covariance*. Pendekatan ini akan menghitung laju fotosintesis berdasarkan nilai *gross primary production* (GPP), respirasi ekosistem, dan *net ecosystem exchange* (NEE). Namun, pendekatan ini memerlukan biaya yang mahal dari sisi instalasi sistem instrumentasi dan biaya pemeliharaan. Untuk mengatasi hal tersebut, pemodelan dinamika  $\text{CO}_2$  sering digunakan (e.g. Besnard et al. 2019; Forkel et al. 2016). Pada penelitian ini, pemodelan penyerapan  $\text{CO}_2$  diterapkan untuk mengkuantifikasi kemampuan kelapa sawit dalam menyerap  $\text{CO}_2$  secara akurat pada lahan yang tidak memiliki instalasi *eddy covariance*. Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini bertujuan untuk: (i) membangun model penyerapan  $\text{CO}_2$  pada tanaman kelapa sawit menggunakan pemodelan dinamika  $\text{CO}_2$ , dan (ii) mengkuantifikasi dinamika karbon (GPP dan NEE) pada tanaman kelapa sawit yang dipengaruhi oleh faktor iklim dan umur tanaman.

## BAHAN DAN METODE

### Wilayah Kajian

Wilayah kajian penelitian ini berada di perkebunan PT. Perkebunan Nusantara VI, Batanghari, Provinsi Jambi, Indonesia. Jenis tanah di lokasi perkebunan berupa tanah mineral. Total luas perkebunan kelapa sawit sekitar 2.000 ha. Rerata tinggi kelapa sawit sekitar 14,8 m. Sistem *eddy covariance* dan instrumen mikrometeorologis dipasang di menara pada beberapa ketinggian di perkebunan kelapa sawit dewasa umur 18 tahun.

### Data dan Pengukuran Lapang

Penelitian ini mengkombinasikan sumber data primer dan data sekunder. Data primer berasal dari pengukuran lapang yang meliputi: (i) fluks  $\text{CO}_2$ , (ii) kecepatan angin, dan (iii) angin vertikal ( $w$ ). Pengukuran tersebut menggunakan sistem *eddy covariance* dengan interval 30 menit dan fluktuasi setiap 10 mikro detik untuk tahun 2015. Data tersebut digunakan untuk memperoleh nilai *net ecosystem exchange* (NEE). Data *photosynthetically active radiation* (PAR) dari sawit umur 18 tahun digunakan sebagai masukan model dan diasumsikan sama pada semua umur tanaman (1-25 tahun).

Karakteristik vegetasi seperti tinggi batang, diameter batang, dan jumlah kelapa sawit per hektar yang diperoleh dari pengukuran lapang digunakan untuk estimasi biomassa menggunakan persamaan allometrik. Hasil estimasi biomassa kemudian divalidasi menggunakan nilai *net primary production* (NPP) hasil

model yang dikonversi menjadi biomassa. Data sekunder untuk membangun model NPP meliputi  $W_{\text{scalar}}$ ,  $P_{\text{scalar}}$ , indeks luas daun (LAI), koefisien pemadaman ( $k_c$ ), berat kering pelepah (BKP), dan jumlah pelepah yang dipangkas (Tabel 1). Data iklim jangka panjang dari Stasiun Meteorologi Sultan Thaha meliputi suhu udara dan kelembaban relatif periode 1994-2018 (25 tahun) yang dapat diakses melalui [http://dataonline.bmkg.go.id/akses\\_data](http://dataonline.bmkg.go.id/akses_data).

### Alat dan Instrumentasi Lapang

Monitoring parameter mikrometeorologi di lokasi penelitian dengan sistem *eddy covariance* menggunakan instrumen sebagai berikut: (i) sensor radiasi matahari (gelombang pendek dan gelombang panjang), (ii) sensor suhu udara yang dipasang di atas atau di bawah kanopi, (iii) sensor kelembaban, (iv) sensor arah angin, dan (v) sensor kecepatan angin yang dipasang di menara pada berbagai ketinggian. Analisis data dilakukan dengan seperangkat komputer yang telah terpasang perangkat lunak Microsoft Excel untuk mengolah data pemodelan, dan OriginPro 9 64-bit untuk membuat grafik hasil pemodelan.

### Penentuan Parameter Model

Data dan parameter yang digunakan untuk membangun model ditentukan berdasarkan data lapang dan data sekunder. Berbagai parameter dan konstanta tersebut ditunjukkan pada Tabel 2.

### Prosedur Analisis Data

Pemodelan fisiologi merupakan dasar untuk memperoleh nilai penyerapan  $\text{CO}_2$  tanaman kelapa sawit. Parameter-parameter yang dibutuhkan dalam penentuan penyerapan  $\text{CO}_2$  yaitu efisiensi cahaya matahari, *fraction of absorbed photosynthetically active radiation* ( $f_{\text{APAR}}$ ), dan *photosynthetically active radiation* (PAR) untuk menghasilkan nilai GPP, NPP, dan NEE. Pemodelan fisiologi dilakukan berdasarkan data harian pada tiap umur tanaman (1-25 tahun) menyesuaikan dengan data validasi yang tersedia. Selanjutnya, nilai tahunan parameter merupakan nilai rerata dari nilai harian parameter tersebut, sehingga menghasilkan nilai GPP, NPP, dan  $\text{CO}_2$ . Tabel 1 menunjukkan parameter dan daftar rujukan persamaan yang digunakan.

### Penentuan Efisiensi Cahaya Matahari ( $\epsilon_g$ ) Tanaman Kelapa Sawit

Efisiensi penggunaan cahaya matahari ( $\epsilon_g$ ) untuk fotosintesis pada tumbuhan dipengaruhi oleh kondisi suhu udara, kelembaban permukaan tanah, dan defisit tekanan uap. Efisiensi penggunaan cahaya maksimum ( $\epsilon_0$ ) yang dibutuhkan berbeda berdasarkan tiap jenis individu tumbuhan tertentu. Persamaan (1) digunakan

untuk menentukan efisiensi cahaya matahari (Xiao et al. 2005).

$$\varepsilon_g = \varepsilon_0 \times T_{\text{scalar}} \times W_{\text{scalar}} \times P_{\text{scalar}} \quad (1)$$

dimana  $\varepsilon_g$  merupakan efisiensi penggunaan radiasi, sedangkan  $\varepsilon_0$  merupakan efisiensi cahaya maksimum ( $\mu\text{mol CO}_2 \mu\text{mol}^{-1} \text{ PAR}$ ). Menurut Dufrene and Saugier (1993),  $\varepsilon_0$  kelapa sawit sebesar  $0,051 \text{ mol CO}_2 \text{ photon}^{-1}$  atau  $2,80 \text{ gC m}^{-2} \text{ MJ}^{-1}$ .  $T_{\text{scalar}}$  merupakan indeks pengaruh suhu berfungsi untuk mendeteksi efek suhu pada proses fotosintesis yang berlangsung di kanopi daun,  $W_{\text{scalar}}$  adalah indeks pengaruh air berfungsi mengetahui efek air pada proses fotosintesis, dan  $P_{\text{scalar}}$  adalah indeks pengaruh fenologi daun.  $T_{\text{scalar}}$  telah dimodelkan berdasarkan model ekosistem terestrial. Persamaan (2) digunakan untuk menentukan  $T_{\text{scalar}}$ .

$$T_{\text{scalar}} = \frac{(T - T_{\text{min}}) \times (T - T_{\text{max}})}{[(T - T_{\text{min}}) \times (T - T_{\text{max}})] - (T - T_{\text{opt}})^2} \quad (2)$$

$T_{\text{scalar}}$  dihitung dari ( $T_a$ ) suhu udara ( $^{\circ}\text{C}$ ), suhu minimum ( $T_{\text{min}}$ ), maksimum ( $T_{\text{max}}$ ), dan suhu optimum ( $T_{\text{opt}}$ ) yang digunakan untuk proses fotosintesis. Jika suhu udara yang diperoleh berada dibawah suhu minimum maka  $T_{\text{scalar}}$  bernilai 0 (Xiao et al. 2005).

Tanaman kelapa sawit memiliki batas suhu pertumbuhan dengan suhu minimum  $11,5^{\circ}\text{C}$  dan suhu maksimum  $38^{\circ}\text{C}$ , dengan suhu optimum sebesar  $23^{\circ}\text{C}$  (Pahan 2008).  $W_{\text{scalar}}$  memperhitungkan dampak kompleks tekanan uap air pada fotosintesis (perubahan konduktansi stomata, potensi air daun, dll) yang disebabkan oleh kelembaban tanah dan defisit tekanan

uap. Defisit tekanan uap (VPD) berpengaruh terhadap nilai GPP (Kimm et al. 2020; Park et al. 2019; Sun et al. 2017; Yuan et al. 2019), dan semakin berpengaruh dengan adanya defisit kelembaban tanah (Green et al. 2019; He et al. 2016; Huang et al. 2016; Proietti et al. 2019; van Schaik et al. 2018).

$W_{\text{scalar}}$  dalam penelitian ini menggunakan hasil penelitian Mariati (2014) umur 1, 5, 10, 14 dan 19 tahun, kemudian kita memodelkan  $W_{\text{scalar}}$  dari umur 1-25 tahun ( $R^2=0,74$ ).  $W_{\text{scalar}}$  tahunan yang diperoleh digunakan untuk menghitung nilai rerata  $\sigma_{W_{\text{scalar}}}$  menggunakan Persamaan (3) pada tiap umur (nilai  $\sigma_{W_{\text{scalar}}}$  harian dalam model menggunakan nilai rerata tahunan). Tekanan uap defisit (VPD) menggunakan rerata harian dari selisih tekanan uap jenuh dengan tekanan uap aktual berdasarkan data kelembaban relatif selama 25 tahun. Persamaan (3) digunakan untuk menghitung nilai  $W_{\text{scalar}}$  harian.

$$W_{\text{scalar}} = \exp \left\{ - \left[ \left( \frac{\text{VPD}}{\sigma_{W_{\text{scalar}}}} \right)^2 \right] \right\} \quad (3)$$

dimana  $\sigma_{W_{\text{scalar}}}$  adalah parameter untuk tekanan air dan VPD adalah defisit tekanan uap.

Tingkat kematangan daun menentukan kapasitas fotosintesis (Dhami et al. 2018; Harmens et al. 2017; Wujeska-Klaue et al. 2019). Perubahan fenologi daun pada kelapa sawit meningkat selama ekspansi daun (pertumbuhan vegetatif), dan mulai menurun karena kanopi terdegradasi (tahap perkembangan) reproduksi atau penuaan). Untuk penelitian ini nilai  $P_{\text{scalar}}$  dimodelkan berdasarkan (Mariati, 2014) untuk

**Tabel 1.** Daftar parameter yang digunakan dalam penelitian ini yang dilengkapi dengan nomor persamaan.

Parameter	Simbol	Satuan	Persamaan
Efisiensi penggunaan radiasi	$\varepsilon_g$	$\text{gC m}^{-2} \text{ MJ}^{-1}$	(1)
Indeks suhu	$T_{\text{scalar}}$	-	(2)
Indeks air	$W_{\text{scalar}}$	-	(3)
Fenologidaun	$P_{\text{scalar}}$	-	(4)
Fraksi PAR	fAPAR	$\text{mol photon m}^{-2} \text{ d}^{-1}$	(5)
Gross primary production	GPP	$\text{gC m}^{-2} \text{ tahun}^{-1}$	(6)
Respirasi autotrof	Ra	$\text{gC m}^{-2} \text{ tahun}^{-1}$	(7)
Net primary production	NPP	$\text{gC m}^{-2} \text{ tahun}^{-1}$	(8)
Net ecosystem exchange	NEE	$\text{gC m}^{-2} \text{ hari}^{-1}$	(9)
Net ecosystem exchange eddy covariance	NEE <sub>EC</sub>	$\text{gC m}^{-2} \text{ hari}^{-1}$	(12)
Total penyerapan CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	$\text{ton ha}^{-1} \text{ tahun}^{-1}$	(13)
Jumlah pelepah pemangkasan satu pohon per tahun	PP	$\text{kg pelepah}^{-1}$	(15)
Berat kering satu pelepah	BKP	$\text{kg pelepah}^{-1}$	(15)
Jumlah kelapa sawit per hektar	PD	kg	(15)
Biomassa tandan buah	BTB	kg	(16)
Varian indeks	Si	-	(27)
Total efek indeks	S <sub>Ti</sub>	-	(28)

**Tabel 2.** Daftar peubah dan nilainya yang digunakan dalam penelitian ini berikut sumber datanya.

Peubah	Simbol	Satuan	Nilai	Sumber
Efisiensi penggunaan cahaya maksimum	$\varepsilon_0$	$\text{gC m}^{-2} \text{ MJ}^{-1}$	2,805	Dufrene and Saugier (1993)
Suhu udara	T	$^{\circ}\text{C}$	-	<a href="http://dataonline.bmkg.go.id/akses_data">http://dataonline.bmkg.go.id/akses_data</a>
Suhu udara minimum	Tmin	$^{\circ}\text{C}$	11,5	Pahan (2008)
Suhu udara maksimum	Tmax	$^{\circ}\text{C}$	38	Pahan (2008)
Suhu udara optimum	Topt	$^{\circ}\text{C}$	23	Pahan (2008)
Kelembaban relatif	RH	%	-	<a href="http://dataonline.bmkg.go.id/akses_data">http://dataonline.bmkg.go.id/akses_data</a>
Koefisien pemadaman	kc	-	0,24; 0,3; 0,36; 0,44; 0,47	Gerritsma (1988). Nilai untuk umur: 1-3, 4-5, 6, 7, 8-9, dan 10 tahun
Leaf area index	LAI	-	1,06; 2,92; 3,93; 4,25; 5,06; 5,16; 6,02	Henson (2007); Afandi (2014); Gerritsma (1988). Nilai untuk umur: 1, 4, 7, 8, 11, 13, dan 18 tahun
Photosynthetically active radiation	PAR	$\text{MJ m}^{-2} \text{ hari}^{-1}$	-	Pengukuran lapangan
Tinggi batang	-	m	-	Pengukuran lapangan
Jumlah pelepah pemangkasan	PP	$\text{kg phn}^{-1} \text{ tahun}^{-1}$	6 pelepah setiap $\text{phn tahun}^{-1}$	Yulianti (2009)
Berat kering 1 pelepah	BKP	-	-	Henson et al. (2012)
Jumlah kelapa sawit per hektar	PD	phn	143	-
Biomassa kg per pohon	-	$\text{kg phn}^{-1}$	0,076	Dewi et al. (2009)
Rata-rata total biomassa pohon/luas lahan	-	$\text{kg luas lahan}^{-1}$	0,00976	Dewi et al. (2009)

memperoleh  $P_{\text{scalar}}$  umur 1-25 tahun ( $R^2=0,98$ ). Nilai  $P_{\text{scalar}}$  tahunan kemudian digunakan untuk perhitungan nilai  $\sigma_{P_{\text{scalar}}}$  berdasarkan Persamaan (4).

Pemodelan LAI menggunakan data literatur terdahulu (Afandi 2014; Gerritsma 1988; Henson 2007) pada umur 1, 4, 7, 8, 11, 13, dan 18 tahun. Nilai LAI tahunan dimodelkan berdasarkan data tersebut. Nilai LAI harian diperoleh dari selisih antara nilai LAI umur lebih tinggi dengan nilai LAI umur lebih rendah dibagi dengan 365 hari pada masing-masing umur. LAI tahunan dikurang dengan hasil bagi 365 hari pada tiap umur untuk memperoleh rerata nilai LAI harian yang disesuaikan sehingga memperoleh nilai  $P_{\text{scalar}}$  harian yang dipengaruhi oleh LAI (Persamaan 4).

$$P_{\text{scalar}} = \exp \left\{ - \left[ \left( \frac{\text{green LAI}_{\text{max}} - \text{green LAI}}{\sigma_{P_{\text{scalar}}}} \right)^2 \right] \right\} \quad (4)$$

dimana  $\sigma_{P_{\text{scalar}}}$  adalah parameter untuk fenologi daun dan  $\text{green LAI}_{\text{max}}$  adalah nilai LAI maksimal.  $\text{Green LAI}_{\text{max}}$  merupakan luas daun maksimum yang digunakan untuk manajemen tanaman tertentu (misal irigasi dan kepadatan tanam). Faktor lain seperti cuaca ekstrem dan serangan hama atau penyakit tanaman dapat mempengaruhi distribusi luas daun dan nilai puncak LAI pada tahun tertentu.

### Penentuan Nilai fAPAR

Fraksi PAR yang digunakan untuk proses fotosintesis dikenal sebagai fAPAR. Nilai fAPAR didekati dengan LAI berdasarkan Hukum Beer-Lambert (Persamaan 5). Dalam hukum tersebut, nilai fAPAR sangat tergantung pada parameter koefisien pemadaman (kc) yang dipengaruhi oleh umur tanaman. Penelitian ini menggunakan nilai koefisien pemadaman yang diperoleh dari Gerritsma (1988).

$$f\text{APAR} = [1 - \exp(-kc * \text{LAI})] \quad (5)$$

### Penentuan Nilai PAR

*Photosynthetically active radiation* (PAR) merupakan bagian dari spektrum radiasi yang digunakan dalam proses fotosintesis. PAR diperoleh dari pengukuran di lapangan tahun 2015.

### Penentuan Nilai GPP

Nilai *gross primary production* (GPP) dapat didekati dengan model *light use efficiency* (Fang et al. 2016; Wagle et al. 2016; Zhang et al. 2017). GPP adalah intensitas fotosintesis harian yang dapat menduga jumlah total karbon yang berhasil diserap oleh tanaman selama proses fotosintesis. GPP ditentukan menggunakan Persamaan (6).

$$GPP = \varepsilon_g \times fAPAR \times PAR \quad (6)$$

### Penentuan Nilai NPP dan Respirasi Autotrof

*Net primary production* (NPP) merupakan sisa karbon total yang berhasil diserap oleh tanaman selama proses fotosintesis setelah sebagiannya digunakan untuk respirasi pertumbuhan dan respirasi pemeliharaan tanaman (e.g. Gómez-Giráldez et al. 2019; Martínez Martínez et al. 2019; Wen et al. 2019). Nilai NPP merupakan nilai GPP dikurangi respirasi autotrof, dimana respirasi autotrof merupakan kombinasi respirasi pertumbuhan dan respirasi pemeliharaan ekosistem. Respirasi autotrof berkisar 30-60% dari total GPP (Xiao et al. 2004), namun dalam penelitian ini digunakan nilai respirasi autotrof sebesar 45% mengikuti Persamaan (7) dan (8) (Hall Jr and Beaulieu 2013).

$$Ra = 0,45 \times GPP \quad (7)$$

$$NPP = GPP - Ra \quad (8)$$

### Penentuan Nilai NEE Model

Nilai NEE mencerminkan jumlah karbon yang diserap atau dilepas oleh ekosistem bervegetasi. Semakin negatif nilai NEE maka karbon yang diserap akan semakin banyak, dan sebaliknya. Nilai NEE merupakan selisih antara NPP dan respirasi tanah pada wilayah ekosistem bervegetasi. Nilai respirasi tanah sangat bervariasi untuk setiap wilayah dan ekosistem. Nilai respirasi tanah dipengaruhi oleh respirasi akar, organisme tanah, suhu tanah, kelembaban tanah, dan jenis tanah. Respirasi tanah menggunakan data sekunder dari penelitian terdahulu (e.g. Henson and Chai 1997; Lamade and Bouillet 2005; Lamade and Setiyo 2002) yang menyebutkan rerata respirasi tanah sebesar 3,55 gC m<sup>-2</sup> hari<sup>-1</sup> yang memiliki karakteristik wilayah dan iklim yang sama seperti wilayah kajian pada penelitian ini. Terakhir, NEE CO<sub>2</sub> ditentukan sebagai selisih antara NPP (Persamaan 8) dengan respirasi tanah (Persamaan 9):

$$NEE = NPP - R_{soil} \quad (9)$$

dimana  $R_{soil}$  adalah respirasi tanah. Untuk validasi model NEE, kita menghitung nilai NEE berdasarkan pendekatan *eddy covariance*, yang dihitung dengan menggunakan nilai kecepatan angin vertikal ( $w$ ) dan konsentrasi CO<sub>2</sub> ( $p_c$ ) pada Persamaan (10-12).

$$w' = w - \bar{w} \quad (10)$$

$$\rho'_c = \rho_c - \bar{\rho}_c \quad (11)$$

$$NEE = \overline{w' \rho'_c} \quad (12)$$

dimana  $w$  adalah kecepatan angin vertikal (m s<sup>-1</sup>),  $w'$  adalah simpangan sesaat pada kecepatan angin vertikal (m s<sup>-1</sup>),  $\bar{w}$  adalah kecepatan angin vertikal rata-rata selama 30 menit (m s<sup>-1</sup>),  $p_c$  adalah konsentrasi CO<sub>2</sub>

(μmol m<sup>-3</sup>),  $p'_c$  adalah simpangan sesaat pada konsentrasi CO<sub>2</sub> (μmol m<sup>-3</sup>), dan  $\bar{p}_c$  adalah konsentrasi CO<sub>2</sub> rata-rata selama 30 menit (μmol m<sup>-3</sup>). Penyerapan CO<sub>2</sub> kelapa sawit kemudian didekati dengan Persamaan (13). Keseluruhan konstanta, parameter, dan persamaan yang digunakan disajikan pada Tabel (1) dan Tabel (2).

$$CO_2 = NPP \times 3,67 \quad (13)$$

dimana angka 3,67 merupakan faktor konversi CO<sub>2</sub> ke satuan ton ha<sup>-1</sup>.

### Perhitungan Biomassa Kelapa Sawit

#### Perhitungan Biomassa di atas Permukaan dan di bawah Permukaan

Kandungan karbon pada biomassa kelapa sawit terdiri dari: (i) biomassa di atas permukaan tanah (AGB), (ii) biomassa di bawah permukaan (BGB), (iii) biomassa pelepah hasil pemangkasan, dan (iv) buah tandan. Dalam penelitian ini, nilai AGB diduga dengan menggunakan persamaan alometrik (pada Persamaan 14), dan BGB diasumsikan sebesar 0,25 dari biomassa di atas permukaan tanah (Rogi 2002). Persamaan alometrik dapat menghubungkan dimensi pohon dengan nilai biomassa pohon (e.g. Djomo and Chimi 2017; Xing et al. 2019). Penelitian ini menggunakan persamaan alometrik kelapa sawit yang dikembangkan pada tanah mineral di Sumatera, Indonesia (Dewi et al. 2009).

$$Biomassa = \text{tinggi batang (m)} \times 0,097 + 0,0706 \text{ (kg phn}^{-1}) \quad (14)$$

#### Perhitungan Biomassa Pelepah Hasil Pemangkasan dan Buah Tandan

Secara umum, proses pemangkasan perkebunan kelapa sawit dilakukan sebanyak 2-3 pelepah per enam bulan (Yulianti 2009). Berdasarkan hal tersebut, kita mengasumsikan sebanyak enam pelepah kelapa sawit dipangkas tiap tahun. Biomassa pelepah pemangkasan dihitung menggunakan Persamaan (15).

$$BPP = [PP \times BKP (\text{kg pelepah}^{-1}) \times PD] / 1000 \quad (15)$$

dimana BPP adalah biomassa pelepah pemangkasan (ton ha<sup>-1</sup> tahun<sup>-1</sup>), PP adalah jumlah pelepah pemangkasan satu pohon setiap tahun (diasumsikan enam pelepah tahun<sup>-1</sup>), PD adalah jumlah kelapa sawit per hektar (phn ha<sup>-1</sup>), dan BKP adalah berat kering satu pelepah (Henson and Chai 1997).

Biomassa tandan buah kelapa sawit dihitung dengan menggunakan Persamaan (16) yang menghubungkan umur kelapa sawit terhadap biomassa tandan buah (Tan et al. 2014).

$$BTB (\text{kg phn}^{-1}) = 78,54 (\ln t) - 18,52 \quad (16)$$

dimana  $t$  adalah umur tanaman (tahun).

### Uji Sensitivitas

Sensitivitas parameter dihitung berdasarkan nilai varians indeks ( $S_i$ ). Dalam penelitian ini nilai sensitivitas dihitung berdasarkan data tahunan tiap parameter. Indeks sensitivitas berbasis varians ini sudah banyak dilakukan oleh peneliti sebelumnya (Delgarm et al., 2018; Zadeh et al., 2017) dengan Persamaan (17).

$$S_i = \frac{V(E(y(t)|X_i))}{V(y(t))} \quad (17)$$

dimana  $S_i$  adalah varian indeks,  $V(E(y(t)|X_i))$  adalah varians nilai harapan pada variabel *input* data tahunan.  $V(y(t))$  adalah varians *output* model data tahunan dengan asumsi bahwa deret waktu (*time series*) *output* model bersifat stasioner. Asumsi ini menganggap nilai harapan sama dengan rata-rata data pada umur tertentu.

Selanjutnya untuk mengetahui total kontribusi parameter *input* terhadap *output* maka digunakan *total effect index* (Piano et al. 2019) dengan Persamaan (18).

$$S_{Ti} = 1 - S_i \quad (18)$$

dimana  $S_{Ti}$  adalah *total effect index*. Parameter input yang digunakan untuk uji sensitivitas adalah suhu, kelembaban udara (RH), dan PAR dengan uji masing-masing sebesar  $\pm 15\%$  dengan langkah 5%. Parameter *output* adalah NPP dan  $CO_2$ .

### Kriteria Validasi Model

Proses validasi dalam penelitian ini dilakukan dua kali yaitu validasi nilai NEE *eddy covariance* dengan nilai NEE model, dan validasi nilai biomassa hasil perhitungan menggunakan persamaan allometrik dan NPP hasil model yang dikonversi menjadi biomassa. Proses validasi dilakukan untuk mendapat nilai parameter model yang sesuai dengan hasil pengukuran. Tiga kriteria statistik yang digunakan untuk evaluasi kinerja model meliputi koefisien determinasi ( $R^2$ , Persamaan 19), akar kesalahan kuadrat (RMSE, Persamaan 20), dan nilai bias (Persamaan 21) (Jiang et al. 2018; Moriasi et al. 2015; Yan et al. 2018).

$$R^2 = \left( \frac{\sum_{i=1}^n (NEE_{EC}(i) - \overline{NEE_{EC}})(NEE_{model}(i) - \overline{NEE_{model}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (NEE_{EC}(i) - \overline{NEE_{EC}})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (NEE_{model}(i) - \overline{NEE_{model}})^2}} \right)^2 \quad (19)$$

$$RE = \frac{NEE_{model} - NEE_{EC}}{NEE_{EC}} \times 100\% \quad (20)$$

$$RSME = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (NEE_{model}(i) - NEE_{EC}(i))^2} \quad (21)$$

dimana  $NEE_{model}$  adalah NEE yang dihitung menggunakan algoritma atau model yang dikembangkan,  $NEE_{EC}$  adalah NEE yang diukur oleh menara (sistem *eddy covariance*) dan  $n$  adalah jumlah sampel.

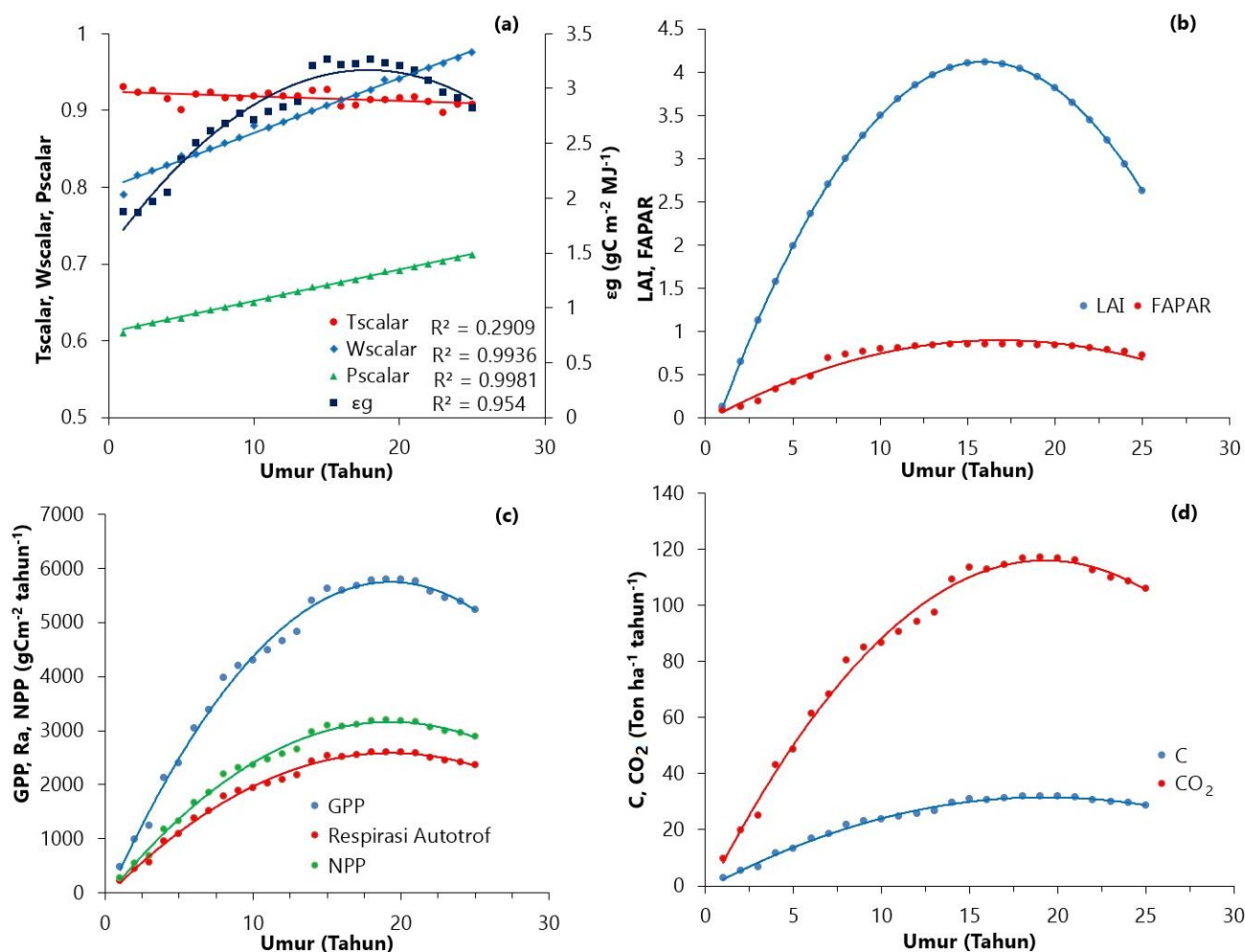
## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Hubungan Tscalar, Wscalar, Pscalar dan Efisiensi Cahaya Matahari dengan Umur Kelapa Sawit

Variasi nilai Tscalar, Wscalar, dan Pscalar sangat menentukan jumlah efisiensi cahaya matahari yang dapat dimanfaatkan untuk proses fotosintesis. Nilai Tscalar terendah pada umur 23 tahun sebesar 0,89 dan tertinggi pada umur satu tahun sebesar 0,93. Wscalar menghitung dampak kompleks tekanan air pada fotosintesis. Hasil analisis menunjukkan nilai Wscalar mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap umur kelapa sawit dengan nilai rerata sebesar 0,89 (min=0,79 dan max=0,98). Nilai minimum Wscalar dicapai pada umur satu tahun, sebaliknya nilai tertinggi pada umur 25 tahun. Gambar 1a menunjukkan bahwa Wscalar terus meningkat seiring pertambahan umur kelapa sawit. Pscalar terendah sebesar 0,61 (umur satu tahun) dan tertinggi sebesar 0,7 (umur 23 tahun) dengan rerata 0,67. Seperti Wscalar, nilai Pscalar juga mengalami peningkatan dengan pertambahan umur (Gambar 1a). Hasil analisis menunjukkan bahwa pertambahan umur kelapa sawit menyebabkan nilai rerata Tscalar, Wscalar, dan Pscalar semakin mendekati nilai satu dan nilai keragamannya ( $S_d$ ) semakin kecil. Hal ini relevan dengan Mariati (2014) bahwa pengaruh suhu, air, dan fenologi daun terhadap pengurangan efisiensi cahaya matahari semakin rendah.

Efisiensi cahaya yang digunakan untuk fotosintesis pada umur satu dan dua tahun memiliki nilai sebesar  $1,8 \text{ gC m}^{-2} \text{ MJ}^{-1}$ . Sebaran nilai efisiensi cahaya ( $\epsilon_g$ ) paling dominan pada areal umur 3-13 tahun ( $>2 \text{ gC m}^{-2} \text{ MJ}^{-1}$ ). Nilai efisiensi cahaya terendah terjadi pada umur satu tahun, sedangkan pada usia 19 tahun memiliki nilai efisiensi cahaya paling tinggi yaitu sebesar  $3,27 \text{ gC m}^{-2} \text{ MJ}^{-1}$ . Hal tersebut disebabkan kelapa sawit mencapai fase vegetatif maksimal, kemudian mulai menurun dengan pertambahan umur kelapa sawit yang menyebabkan klorofil terdegradasi. Nilai intersepsi penggunaan cahaya berfluktuasi mengikuti radiasi global yang ada di atas tajuk tanaman.

Efisiensi penggunaan cahaya berkorelasi dengan umur tanaman dengan pola hubungan kuadratik yaitu saat fase vegetatif maksimal, nilai intersepsi cenderung tinggi atau sama bahkan pada akhir umur tanaman cenderung menurun (Mubarak and June 2018). Rerata nilai efisiensi cahaya tanaman kelapa sawit sebesar  $2,78 \text{ gC m}^{-2} \text{ MJ}^{-1}$  ( $S_d = 0,46$ ). Hubungan efisiensi penggunaan cahaya dengan umur kelapa sawit memiliki pengaruh yang signifikan terhadap umur. Nilai rerata efisiensi cahaya matahari bertambah seiring peningkatan umur kelapa sawit dan mulai menurun ketika menua (Gambar 1a).



**Gambar 1.** Hubungan umur kelapa sawit dengan (a) Tscalar, Wscalar, Pscalar, dan  $\epsilon_g$ , (b) LAI dan fAPAR, (c) GPP, respirasi autotrof, dan NPP, dan (d) C dan  $\text{CO}_2$

### Hubungan LAI dan fAPAR Terhadap Umur Kelapa Sawit

Pendugaan LAI pada umur kelapa sawit yang berbeda menunjukkan bahwa luasan daun pada tajuk kelapa sawit cenderung semakin meningkat dengan pertambahan umur tanaman (Gambar 1b). LAI terendah teramati pada umur satu tahun (1,06) dan LAI tertinggi pada umur 19 tahun (5,9). Rerata nilai LAI selama 25 tahun sebesar 4,67. Nilai tersebut cukup relevan dengan hasil penelitian yang menyatakan bahwa LAI kelapa sawit berkisar antara 2,86-7,19 dan kelapa sawit <5 tahun memiliki nilai LAI sekitar 2-5,7 (Tan et al. 2014).

Perubahan nilai fAPAR dipengaruhi oleh LAI. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa fAPAR meningkat seiring penambahan umur kelapa sawit (Gambar 1b). fAPAR terendah terdapat pada umur satu tahun (0,08) dan fAPAR tertinggi terdapat pada umur 18 tahun (0,85). Nilai ini cukup relevan dengan hasil penelitian terdahulu (Silva et al. 2019). Nilai fAPAR perkebunan kelapa sawit menunjukkan bahwa kanopi perkebunan kelapa sawit yang berumur di atas 10

tahun memiliki kapasitas penyerapan radiasi PAR yang besar lalu mulai menurun seiring dengan pertambahan umur. Hasil pengukuran lapangan tahun 2015 menunjukkan nilai PAR sebesar 7,06  $\text{MJ m}^{-2} \text{ hari}^{-1}$  dan diasumsikan sama pada semua umur tanaman.

### Hubungan *Gross Primary Production* (GPP), *Respirasi Autotrof*, dan *Net Primary Production* (NPP) dengan Umur Kelapa Sawit

GPP merupakan hasil dari proses fotosintesis suatu organisme yang menjadi komponen utama dari keseimbangan karbon antara biosfer dan atmosfer. Tanaman kelapa sawit berumur satu tahun memiliki nilai GPP paling rendah yaitu sebesar 1,33  $\text{gC m}^{-2} \text{ hari}^{-1}$  (487,21  $\text{gC m}^{-2} \text{ tahun}^{-1}$ ), dan paling tinggi pada tanaman kelapa sawit berumur 19 tahun dengan nilai GPP sebesar 15,88  $\text{gC m}^{-2} \text{ hari}^{-1}$  (5.796  $\text{gC m}^{-2} \text{ tahun}^{-1}$ ) (Gambar 1c). Nilai GPP pada areal perkebunan berumur 2-10 tahun berkisar antara 2,71-11,76  $\text{gC m}^{-2} \text{ hari}^{-1}$  (~989-4.295  $\text{gC m}^{-2} \text{ tahun}^{-1}$ ). Pada areal perkebunan berumur 11-20 tahun, nilai GPP berkisar antara 12,28-15,85  $\text{gC m}^{-2} \text{ hari}^{-1}$  (~4.485-5.786  $\text{gC m}^{-2} \text{ tahun}^{-1}$ ). Nilai

GPP maksimum terjadi pada umur 19 tahun yang merupakan umur paling produktif. Nilai GPP tersebut dipengaruhi oleh nilai efisiensi cahaya, LAI, dan fAPAR yang tinggi. Pada areal umur 9-14 tahun, terjadi penurunan nilai GPP yang diduga terjadi akibat pemangkasan untuk mempermudah proses pemanenan. GPP umur 21-25 tahun berkisar antara 15,76-14,35 gC m<sup>-2</sup> hari<sup>-1</sup>. Rata-rata nilai GPP dari berbagai umur sebesar 11,74 gC m<sup>-2</sup> hari<sup>-1</sup> (4.286 gC m<sup>-2</sup> tahun<sup>-1</sup>), nilai tersebut lebih tinggi dibandingkan hasil penelitian yang dilakukan oleh Tan *et al.* (2014) di Malaysia yaitu sebesar 7,93 dan 8,07 gC m<sup>-2</sup> hari<sup>-1</sup>.

Kisaran nilai GPP setiap umur kajian berbeda disebabkan perbedaan nilai LAI yang mempengaruhi nilai fAPAR pada umur yang sama. Penentuan NPP dipengaruhi nilai GPP dan respirasi tiap vegetasi. Gambar 1c menunjukkan hubungan umur dengan respirasi autotrof. Respirasi autotrof meningkat dari 219 gC m<sup>-2</sup> tahun<sup>-1</sup> pada umur 1 tahun menjadi 2.608 gC m<sup>-2</sup> tahun<sup>-1</sup> umur 19 tahun (nilai rerata sebesar 1.929 gC m<sup>2</sup> tahun<sup>-1</sup>). Berdasarkan hasil uji statistik, respirasi autotrof memiliki pengaruh yang kuat dengan umur tanaman. Nilai NPP pada umur 1-10 tahun berkisar antara 267-2.362 gC m<sup>-2</sup> tahun<sup>-1</sup>. Nilai ini lebih rendah dari hasil penelitian sebelumnya yang menunjukkan nilai NPP sebesar 2.931 gC m<sup>-2</sup> tahun<sup>-1</sup> pada umur 10 tahun (Mariati 2014).

Sebaran nilai NPP paling dominan pada areal perkebunan umur 11-18 tahun dengan nilai berkisar antara 2.466-3.180 gC m<sup>-2</sup> tahun<sup>-1</sup> dan pada umur 19 tahun sebesar 3.188 gC m<sup>-2</sup> tahun<sup>-1</sup> yang merupakan usia dengan NPP paling tinggi dalam siklus 25 tahun. Sebaran NPP menurun pada usia 20-25 tahun yang memiliki kisaran nilai dari 3.182-2.881 gC m<sup>-2</sup> tahun<sup>-1</sup>. Akumulasi NPP dari umur 1-25 tahun diperoleh nilai rata-rata NPP sebesar 2.357 gC m<sup>-2</sup> tahun<sup>-1</sup>. Nilai rerata karbon selama 25 tahun sebesar 23,57 tC ha<sup>-1</sup> tahun<sup>-1</sup> (Sd=9,14; min=2,67; max=31,88) (Gambar 1d). Perbedaan nilai NPP pada kelapa sawit disebabkan perbedaan lingkungan tempat tumbuh kelapa sawit seperti nutrisi, air, faktor iklim, cahaya, dan pendekatan dan kompleksitas model yang digunakan.

## Penyerapan CO<sub>2</sub> Kelapa Sawit

Gambar 1d menunjukkan penyerapan C dan CO<sub>2</sub> pada berbagai umur tanaman kelapa sawit. Hasil konversi nilai NPP menunjukkan bahwa kelapa sawit umur satu tahun memiliki kemampuan menyerap CO<sub>2</sub> sebesar 9,8 ton ha<sup>-1</sup> tahun<sup>-1</sup> dan terus meningkat hingga 117 ton ha<sup>-1</sup> tahun<sup>-1</sup> pada umur 19 tahun. Nilai ini lebih rendah jika dibandingkan hasil penelitian sebelumnya di Jambi yang memperoleh NPP<sub>total</sub> sebesar 121 ton ha<sup>-1</sup> tahun<sup>-1</sup> CO<sub>2</sub> (Kotowska *et al.* 2015). Umur 19 tahun merupakan umur dengan penyerapan yang paling tinggi dan selanjutnya menurun secara perlahan. Peningkatan awal yang signifikan pada kelapa sawit umur 4-13 tahun. Umur 15-19 tahun tidak terjadi peningkatan penyerapan secara signifikan dan cenderung stabil, sedangkan pada umur 20 tahun mulai menurun hingga 25 tahun. Rerata penyerapan CO<sub>2</sub> dari umur 1-25 tahun sebesar 86,5 ton ha<sup>-1</sup> tahun<sup>-1</sup>.

## Uji Sensitivitas

Parameter masukan model yang digunakan untuk uji sensitivitas adalah suhu udara, RH, dan PAR dengan uji masing-masing sebesar 5%, 10%, 15%, -5%, -10% dan -15%. Parameter luaran model yang digunakan adalah NPP dan CO<sub>2</sub>. Gambar 2a menunjukkan parameter suhu paling sensitif daripada parameter lainnya terhadap NPP dan CO<sub>2</sub>. Kenaikan suhu meningkatkan CO<sub>2</sub> dan NPP menurun, sedangkan penurunan suhu menyebabkan NPP meningkat dan CO<sub>2</sub> menurun. Namun terjadi sebaliknya pada RH dan PAR, ketika RH dan PAR menurun menyebabkan NPP menurun dan CO<sub>2</sub> meningkat sedangkan jika RH dan PAR meningkat menyebabkan NPP meningkat dan CO<sub>2</sub> menurun.

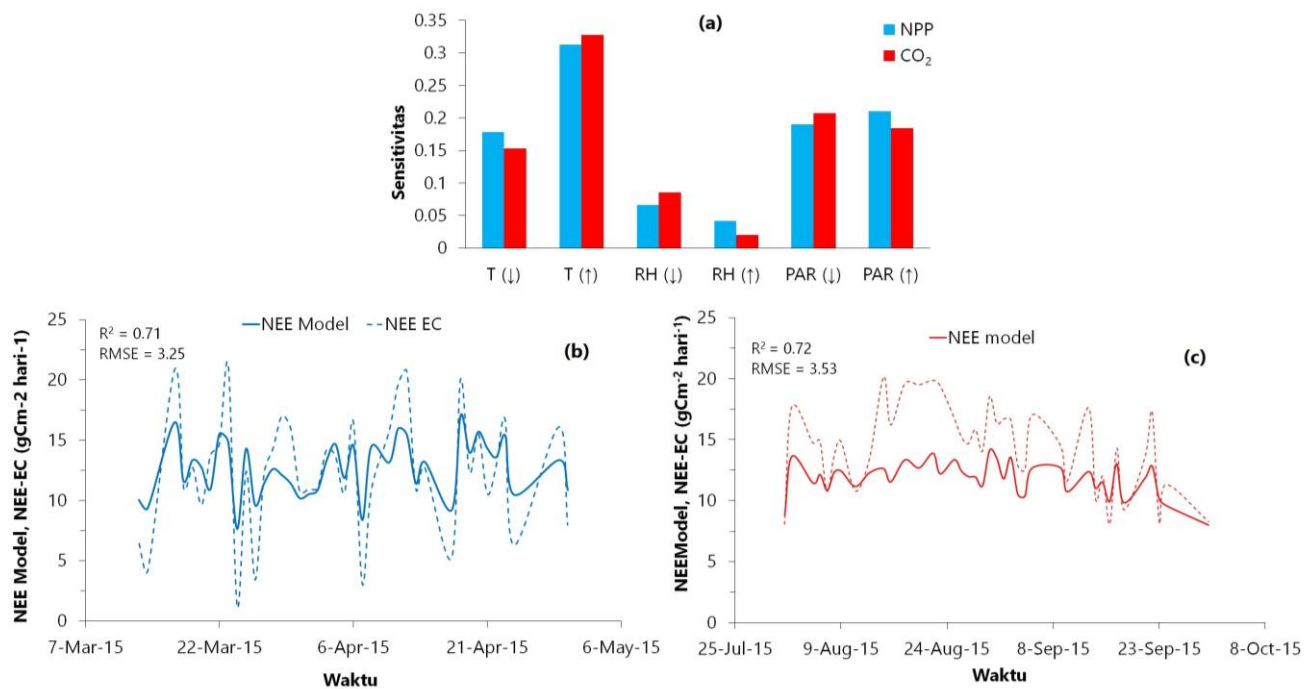
## Validasi Biomassa dengan NPP Model

Validasi biomassa dengan NPP dilakukan pada tanaman umur 1, 7, dan 18 tahun. Berdasarkan persamaan alometrik, nilai biomassa kelapa sawit sebesar 5,18; 19,45; dan 30,12 ton ha<sup>-1</sup> tahun<sup>-1</sup> secara berurutan untuk 1, 7, dan 18 tahun. Perhitungan tersebut menunjukkan bahwa peningkatan biomassa total pada setiap peningkatan umur cukup relevan bila

**Tabel 4.** Validasi hasil biomassa model terhadap pengukuran di lapang.

Umur	Biomassa Pengukuran (ton ha <sup>-1</sup> tahun <sup>-1</sup> )	Biomassa model (ton ha <sup>-1</sup> tahun <sup>-1</sup> )	Rataan bias mutlak (RE)
1	5,18	2,67	6,262
7	19,45	18,56	0,785
18	30,11	31,80	2,841
Rata-rata	18,25	17,68	
<i>Indikator Statistik</i>			
RSME	1,815		
R <sup>2</sup>	0,95		





**Gambar 2.** (a) Uji sensitivitas parameter input, (b) pola NEE model dan NEE<sub>EC</sub> pada kondisi basah, dan (c) pola NEE model dan NEE<sub>EC</sub> pada kondisi kering.

dilihat dari ukuran data lingkaran batang, diameter batang, jumlah pelepah, dan tinggi batang yang semakin meningkat seiring pertambahan umur. Tabel 4 menyajikan biomassa total kelapa sawit berdasarkan umur. Biomassa model (hasil konversi nilai NPP model) menunjukkan rerata biomassa kelapa sawit yaitu 2,67; 18,56; dan 31,8 ton ha<sup>-1</sup> untuk kelapa sawit umur 1, 7, dan 18 tahun. Performa model menunjukkan nilai statistik yang bagus (RMSE=1,815; R<sup>2</sup>=0,95). Namun model cenderung *underestimate* untuk memprediksi biomassa sawit.

### Validasi *Net Ecosystem Exchange* (NEE)

Nilai NEE dapat digunakan untuk mengetahui jumlah karbon yang diserap atau dilepas suatu ekosistem vegetasi. Semakin negatif nilai NEE *eddy covariance* maka karbon yang diserap akan semakin banyak dan sebaliknya. Nilai NEE *eddy covariance* dalam penelitian ini diubah menjadi bertanda positif karena NEE keluaran model bertanda positif. Nilai NEE harian *eddy covariance* pada bulan basah yaitu bulan Maret-April diperoleh dari hasil pertambahan nilai NEE dalam satu hari.

Performa model menunjukkan NEE pengukuran dan NEE model pada kondisi basah memiliki pola yang mirip dan rata-rata nilai bias yang kecil (R<sup>2</sup>=0,71; RSME=3,25; Gambar 2b). Sedangkan hasil validasi dinamika NEE model dan NEE pengukuran pada kondisi kering yaitu bulan Agustus dan September memperoleh R<sup>2</sup> sebesar 0,72; RSME 3,5 dan memiliki rata-rata nilai bias yang rendah (Gambar 2c). Berdasarkan metrik statistik tersebut dapat dikatakan bahwa

model dapat digunakan untuk menghitung nilai NEE harian pada bulan basah dan bulan kering.

Nilai NEE pada kondisi basah lebih tinggi dibandingkan kondisi kering dan memiliki pola yang berbeda. Hal ini dipengaruhi oleh faktor curah hujan, *photosynthetic photon flux density* (PPFD), dan efisiensi fotosintesis yang berimplikasi pada jumlah CO<sub>2</sub> yang diserap. Faktor lain seperti efisiensi penggunaan air pada ekosistem untuk kebutuhan produksi (fotosintesis) jauh lebih tinggi pada saat kondisi kering. Penelitian Meijide *et al.* (2017) menunjukkan bahwa *water use efficiency* (WUE) sawit akan lebih tinggi pada saat musim kering.

Faktor pembatas lain seperti nilai kelembaban tanah dan defisit tekanan uap yang juga memiliki pengaruh signifikan bagi aktivitas fisiologi sawit. Selain itu radiasi neto menjadi salah satu faktor yang memengaruhi fotosintesis pada tanaman sawit, sehingga akan mempengaruhi penyerapan karbon oleh ekosistem yang berimplikasi dari uap air terhadap nilai defisit tekanan uap di ekosistem yang mempengaruhi intensitas membuka dan menutupnya stomata daun. Hal inilah yang akan memengaruhi nilai NEE pada ekosistem (Li *et al.* 2016). Selain itu, suhu udara maksimum, nilai kelembaban relatif dan lama penyinaran merupakan faktor lingkungan yang dapat mempengaruhi asimilasi karbon.

### KESIMPULAN

Perkebunan kelapa sawit memiliki kemampuan penyerapan CO<sub>2</sub> yang tinggi yang menandakan bahwa

pengembangan perkebunan kelapa sawit tidak selalu negatif untuk lingkungan. Jika perluasan lahan perkebunan kelapa sawit dilakukan pada lahan marginal akan sangat menguntungkan bagi ekosistem di suatu wilayah. Pola distribusi NPP mengikuti pola distribusi nilai GPP karena NPP dipengaruhi oleh nilai GPP sehingga diperoleh nilai NPP tahunan. Hasil validasi atau uji statistik menunjukkan bahwa NPP hasil model mirip dengan biomassa pengukuran. Nilai R-square model terhadap biomassa pengukuran sebesar 0,95, nilai RMSE adalah sebesar 1,81 sedangkan hasil validasi NEE pengukuran dan NEE model pada kondisi basah menunjukkan  $R^2$  sebesar 0,71 dan RSME 3,25. Nilai  $R^2$  pada kondisi kering adalah 0,72 dan RSME 3,5, hal ini menunjukkan bahwa model penyerapan  $\text{CO}_2$  pada tanaman kelapa sawit yang dibangun dapat digunakan untuk mengkuantifikasi dinamika karbon (GPP dan NEE) pada tanaman kelapa sawit yang dipengaruhi oleh faktor iklim dan umur tanaman sehingga model ini dapat digunakan untuk menduga dinamika  $\text{CO}_2$  pada lahan yang tidak tersedia instalasi sistem *eddy covariance*.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Afandi, A., 2014. Karakteristik Radiasi Matahari Pertanaman Kelapa Sawit: Implikasi terhadap Iklim Mikro dan Potensi Tanaman Sela. IPB, Bogor.
- Ahmad, F.B., Zhang, Z., Doherty, W.O.S., O'Hara, I.M., 2019. The prospect of microbial oil production and applications from oil palm biomass. *Biochemical Engineering Journal* 143, 9–23. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2018.12.003>
- Besnard, S., Carvalhais, N., Arain, M.A., Black, A., Brede, B., Buchmann, N., Chen, J., Clevers, J.G.W., Dutrieux, L.P., Gans, F., 2019. Memory effects of climate and vegetation affecting net ecosystem  $\text{CO}_2$  fluxes in global forests. *PloS one* 14.
- Delgarm, N., Sajadi, B., Azarbad, K., Delgarm, S., 2018. Sensitivity analysis of building energy performance: A simulation-based approach using OFAT and variance-based sensitivity analysis methods. *Journal of Building Engineering* 15, 181–193. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2017.11.020>
- Dewi, S., Khasanah, N., Rahayu, S., Ekadinata, A., van Noordwijk, M., 2009. Carbon footprint of Indonesian palm oil production: a pilot study. Bogor, Indonesia. World Agroforestry Centre-ICRAF, SEA Regional Office 8.
- Dhami, N., Tissue, D.T., Cazzonelli, C.I., 2018. Leaf-age dependent response of carotenoid accumulation to elevated  $\text{CO}_2$  in Arabidopsis. *Archives of Biochemistry and Biophysics* 647, 67–75. <https://doi.org/10.1016/j.abb.2018.03.034>
- Djomo, A.N., Chimi, C.D., 2017. Tree allometric equations for estimation of above, below and total biomass in a tropical moist forest: Case study with application to remote sensing. *Forest Ecology and Management* 391, 184–193. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.02.022>
- Dufrene, E., Saugier, B., 1993. Gas exchange of oil palm in relation to light, vapour pressure deficit, temperature and leaf age. *Functional Ecology* 97–104.
- Fang, W., Wei, S., Yi, C., Hendrey, G.R., 2016. A Global Study of GPP focusing on Light Use Efficiency in a Random Forest Regression Model. AGU Fall Meeting Abstracts 33.
- Fei, L., Shuwen, Z., Jiuchun, Y., Liping, C., Haijuan, Y., Kun, B., 2018. Effects of land use change on ecosystem services value in West Jilin since the reform and opening of China. *Ecosystem Services* 31, 12–20. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2018.03.009>
- Forkel, M., Carvalhais, N., Rödenbeck, C., Keeling, R., Heimann, M., Thonicke, K., Zaehle, S., Reichstein, M., 2016. Enhanced seasonal  $\text{CO}_2$  exchange caused by amplified plant productivity in northern ecosystems. *Science* 351, 696–699.
- Gerritsma, W., 1988. Light interception, leaf photosynthesis and sink-source relations in oil palm. Agricultural University Wageningen.
- Gómez-Giráldez, P.J., Aguilar, C., Caño, A.B., García-Moreno, A., González-Dugo, M.P., 2019. Remote sensing estimation of net primary production as monitoring indicator of holm oak savanna management. *Ecological Indicators* 106, 105526. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105526>
- Green, J.K., Seneviratne, S.I., Berg, A.M., Findell, K.L., Hagemann, S., Lawrence, D.M., Gentine, P., 2019. Large influence of soil moisture on long-term terrestrial carbon uptake. *Nature* 565, 476–479. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0848-x>
- Hall Jr, R.O., Beaulieu, J.J., 2013. Estimating autotrophic respiration in streams using daily metabolism data. *Freshwater Science* 32, 507–516.
- Harmens, H., Hayes, F., Sharps, K., Mills, G., Calatayud, V., 2017. Leaf traits and photosynthetic responses of *Betula pendula* saplings to a range of ground-level ozone concentrations at a range of nitrogen loads. *Journal of Plant*

- Physiology 211, 42–52.  
<https://doi.org/10.1016/j.jplph.2017.01.002>
- He, M., Kimball, J.S., Running, S., Ballantyne, A., Guan, K., Huemmrich, F., 2016. Satellite detection of soil moisture related water stress impacts on ecosystem productivity using the MODIS-based photochemical reflectance index. *Remote Sensing of Environment* 186, 173–183.  
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.08.019>
- Henson, I., Chai, S., 1997. Analysis of oil palm productivity. II. Biomass, distribution, productivity and turnover of the root system. *Elaeis* 9, 78–92.
- Henson, I.E., 2007. Modelling the effects of physiological and morphological characters on oil palm growth and productivity. *Oil Palm Bulletin* 54, 1.
- Henson, I.E., Betitis, T., Tomda, Y., Chase, L.D., 2012. The estimation of frond base biomass (FBB) of oil palm. *Journal of oil palm research* 24, 1473–1479.
- Huang, Y., Gerber, S., Huang, T., Lichstein, J.W., 2016. Evaluating the drought response of CMIP5 models using global gross primary productivity, leaf area, precipitation, and soil moisture data. *Global Biogeochemical Cycles* 30, 1827–1846.  
<https://doi.org/10.1002/2016GB005480>
- Jiang, S., Ren, L., Xu, C.-Y., Yong, B., Yuan, F., Liu, Y., Yang, X., Zeng, X., 2018. Statistical and hydrological evaluation of the latest Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM (IMERG) over a midlatitude humid basin in South China. *Atmospheric Research* 214, 418–429.  
<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.08.021>
- June, T., Ibrom, A., GRAVENHORsr, 2006. Integration of NPP semi mechanistic - modelling, remote sensing and cis in estimating CO2 absorption of forest vegetation in Lore Lindu National Park. *BIOTROPIA - The Southeast Asian Journal of Tropical Biology* 13.  
<https://doi.org/10.11598/btb.2006.13.1.217>
- Ke, H., Gong, S., He, J., Zhou, C., Zhang, L., Zhou, Y., 2019. Spatial and temporal distribution of open biomass burning in China from 2013 to 2017. *Atmospheric Environment* 210, 156–165.  
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.04.039>
- Kimm, H., Guan, K., Gentine, P., Wu, J., Bernacchi, C.J., Sulman, B.N., Griffis, T.J., Lin, C., 2020. Redefining droughts for the U.S. Corn Belt: The dominant role of atmospheric vapor pressure deficit over soil moisture in regulating stomatal behavior of Maize and Soybean. *Agricultural and Forest Meteorology* 287, 107930.  
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.107930>
- Koh, K.S., Chew, S.J., Choo, C.M., Chok, V.S., 2019. Heat Integration of a Boiler and Its Corresponding Environmental Study in an Oleochemical Production Plant: An Industry Case Study in Malaysia. *ChemEngineering* 3, 82.  
<https://doi.org/10.3390/chemengineering3040082>
- Kollanus, V., Marje, P., Alexandra, G., Joana, S., Julius, V., Kukkonen Jaakko, Sofiev Mikhail, Salonen Raimo O., Lanki Timo, 2017. Mortality due to Vegetation Fire–Originated PM2.5 Exposure in Europe—Assessment for the Years 2005 and 2008. *Environmental Health Perspectives* 125, 30–37. <https://doi.org/10.1289/EHP194>
- Kotowska, M.M., Leuschner, C., Triadiati, T., Meriem, S., Hertel, D., 2015. Quantifying above-and belowground biomass carbon loss with forest conversion in tropical lowlands of S umatra (Indonesia). *Global change biology* 21, 3620–3634.
- Lamade, E., Bouillet, J.-P., 2005. Carbon storage and global change: the role of oil palm. *OCL. Oléagineux Corps gras Lipides* 12, 154–160.
- Lamade, E., Setiyo, I.E., 2002. Characterisation of carbon pools and dynamics for oil palm and forest ecosystems: application to environmental evaluation. *IOPRI*.
- Li, H., Wang, A., Yuan, F., Guan, D., Jin, C., Wu, J., Zhao, T., 2016. Evapotranspiration dynamics over a temperate meadow ecosystem in eastern Inner Mongolia, China. *Environmental Earth Sciences* 75, 978.
- Malley, Z.J.U., Mmari, W.N., Mzimhiri, M.K., 2016. Combining Tree-Crop Farming: Mimicking Farmers' Mixed Cropping and Land Fallowing Practices in Developing Sustainable Farmland Management System. *Journal of Agriculture and Sustainability* 9.
- Mariati, H., 2014. Integrasi Remote Sensing Dan Pemodelan Fisisologi Untuk Pendugaan Npp (Net Primary Production) Pada Pertanaman Kelapa Sawit. *IPB Univeristy, Bogor*.
- Martínez Martínez, Y., Goecke Coll, D., Aguayo, M., Casas-Ledón, Y., 2019. Effects of landcover changes on net primary production (NPP)-based exergy in south-central of Chile. *Applied Geography* 113, 102101.  
<https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2019.102101>
- Meijide, A., Röhl, A., Fan, Y., Herbst, M., Niu, F., Tiedemann, F., June, T., Rauf, A., Hölscher, D., Knohl, A., 2017. Controls of water and energy

- fluxes in oil palm plantations: Environmental variables and oil palm age. *Agricultural and Forest Meteorology* 239, 71–85.
- Moriasi, D.N., W. Gitau, M., Pai, N., Daggupati, P., 2015. Hydrologic and Water Quality Models: Performance Measures and Evaluation Criteria. *Transactions of the ASABE* 58, 1763–1785. <https://doi.org/10.13031/trans.58.10715>
- Mubarak, S., June, T., 2018. Efisiensi Penggunaan Radiasi Matahari dan Respon Tanaman Kedelai (*Glycine max* L.) terhadap Penggunaan Mulsa Reflektif. *Jurnal Agronomi Indonesia* (Indonesian Journal of Agronomy) 46, 247–253.
- Pahan, I., 2008. Panduan Lengkap Kelapa Sawit: Manajemen Agribisnis dari Hulu hingga Hilir. Penebar Swadaya. Jakarta 412.
- Park, H., Im, J., Kim, M., 2019. Improvement of satellite-based estimation of gross primary production through optimization of meteorological parameters and high resolution land cover information at regional scale over East Asia. *Agricultural and Forest Meteorology* 271, 180–192. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.02.040>
- Piano, S.L., Ferretti, F., Puy, A., Albrecht, D., Tarantola, S., Saltelli, A., 2019. A new sample-based algorithms to compute the total sensitivity index. *arXiv:1703.05799 [stat]*.
- Proietti, C., Anav, A., Vitale, M., Fares, S., Fornasier, M.F., Screpanti, A., Salvati, L., Paoletti, E., Sicard, P., De Marco, A., 2019. A New Wetness Index to Evaluate the Soil Water Availability Influence on Gross Primary Production of European Forests. *Climate* 7, 42. <https://doi.org/10.3390/cli7030042>
- Rincón, L.A., Cadavid, J.G., Orjuela, A., 2019. Used cooking oils as potential oleochemical feedstock for urban biorefineries – Study case in Bogota, Colombia. *Waste Management* 88, 200–210. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.03.042>
- Rogi, J., 2002. Penyusunan model simulasi dinamika nitrogen pertanaman kelapa sawit (*Elaeis guineensis*, Jacq.) di unit Usaha Bekri Propinsi Lampung. Disertasi. Institut Pertanian Bogor, Bogor.
- Silva, D.A. da, Vibrans, A.C., Silva, D.A. da, Vibrans, A.C., 2019. Canopy Architecture After Selective Logging in a Secondary Atlantic Rainforest in Brazil. *Floresta e Ambiente* 26. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.037418>
- Sun, W., Maseyk, K.S., Lett, C., Seibt, U., 2017. The influence of vapor pressure deficit (VPD) on the use of carbonyl sulfide (COS) as a photosynthetic tracer. *AGU Fall Meeting Abstracts* 21.
- Tan, K.P., Kanniah, K.D., Cracknell, A.P., 2014. On the upstream inputs into the MODIS primary productivity products using biometric data from oil palm plantations. *International Journal of Remote Sensing* 35, 2215–2246.
- van Schaik, E., Killaars, L., Smith, N.E., Koren, G., van Beek, L.P.H., Peters, W., van der Laan-Luijkx, I.T., 2018. Changes in surface hydrology, soil moisture and gross primary production in the Amazon during the 2015/2016 El Niño. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 373, 20180084. <https://doi.org/10.1098/rstb.2018.0084>
- Wagle, P., Gowda, P.H., Xiao, X., Kc, A., 2016. Parameterizing ecosystem light use efficiency and water use efficiency to estimate maize gross primary production and evapotranspiration using MODIS EVI. *Agricultural and Forest Meteorology* 222, 87–97. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.03.009>
- Wen, Y., Liu, X., Bai, Y., Sun, Y., Yang, J., Lin, K., Pei, F., Yan, Y., 2019. Determining the impacts of climate change and urban expansion on terrestrial net primary production in China. *Journal of Environmental Management* 240, 75–83. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.03.071>
- Wujeska-Klaue, A., Crous, K.Y., Ghannoum, O., Ellsworth, D.S., 2019. Leaf age and eCO<sub>2</sub> both influence photosynthesis by increasing light harvesting in mature *Eucalyptus tereticornis* at EucFACE. *Environmental and Experimental Botany* 167, 103857. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2019.103857>
- Xiao, X., Zhang, Q., Braswell, B., Urbanski, S., Boles, S., Wofsy, S., Moore III, B., Ojima, D., 2004. Modeling gross primary production of temperate deciduous broadleaf forest using satellite images and climate data. *Remote Sensing of Environment* 91, 256–270.
- Xiao, X., Zhang, Q., Saleska, S., Hutrya, L., De Camargo, P., Wofsy, S., Frolking, S., Boles, S., Keller, M., Moore III, B., 2005. Satellite-based modeling of gross primary production in a seasonally moist tropical evergreen forest. *Remote Sensing of Environment* 94, 105–122.
- Xing, D., Bergeron, J.A.C., Solarik, K.A., Tømm, B., Macdonald, S.E., Spence, J.R., He, F., 2019.

- Challenges in estimating forest biomass: use of allometric equations for three boreal tree species. *Can. J. For. Res.* 49, 1613–1622. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2019-0258>
- Yan, H., Liang, M., Han1, B., 2, 2018. A Study on Rapid Non-destructive Detection of Eugenol in Caryophylli Flos by NIR Spectroscopy and Partial Least Square. *Indian Journal of Pharmaceutical Sciences* 80, 1136–1142. <https://doi.org/10.4172/pharmaceutical-sciences.1000465>
- Yuan, W., Zheng, Y., Piao, S., Ciais, P., Lombardozzi, D., Wang, Y., Ryu, Y., Chen, G., Dong, W., Hu, Z., Jain, A.K., Jiang, C., Kato, E., Li, S., Lienert, S., Liu, S., Nabel, J.E.M.S., Qin, Z., Quine, T., Sitch, S., Smith, W.K., Wang, F., Wu, C., Xiao, Z., Yang, S., 2019. Increased atmospheric vapor pressure deficit reduces global vegetation growth. *Science Advances* 5, eaax1396. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aax1396>
- Yulianti, N., 2009. Cadangan Karbon Lahan Gambut Dari Agroekosistem Kelapa Sawit PTPN IV Ajamu Kabupaten Labuhan Batu Sumatera Utara. Bogor: Sekolah Pascasarjana IPB.
- Zadeh, F.K., Nossent, J., Sarrazin, F., Pianosi, F., van Griensven, A., Wagener, T., Bauwens, W., 2017. Comparison of variance-based and moment-independent global sensitivity analysis approaches by application to the SWAT model. *Environmental Modelling & Software* 91, 210–222. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.02.001>
- Zhang, Y., Xiao, X., Wu, X., Zhou, S., Zhang, G., Qin, Y., Dong, J., 2017. A global moderate resolution dataset of gross primary production of vegetation for 2000–2016. *Scientific Data* 4, 1–13. <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.165>